

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ-3

КУРСОВА РОБОТА

Тема «Графоаналітичні методи розрахунку нелінійного ланцюга»

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»,
спеціалізаціями «Електронні системи і компоненти»,
«Електронні прилади та пристрої»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Теорія електричних кіл - 3: Курсова робота. Тема «Графоаналітичні методи розрахунку нелінійного ланцюга» [електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізацій «Електронні системи і компоненти», «Електронні прилади та пристрої» / КПІ імені Ігоря Сікорського; уклад.: В. Я. Ромашко, Л. М. Батрак. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,5 Мбайт). – Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019. – 37 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 01.04.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету (протокол № 03/2019 від 25.03.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ-3

КУРСОВА РОБОТА

Тема «Графоаналітичні методи розрахунку нелінійного ланцюга»

Укладачі: *Ромашко Володимир Якович, д-р техн. наук, проф.*
Батрак Лариса Миколаївна, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Вербицький Є.В., канд. техн. наук, доц.*

Рецензенти: *Чадюк В.О., канд. техн. наук, доц.*

Посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка» і тих, хто вивчає електротехніку та електроніку. В посібнику описано етапи виконання курсової роботи, зміст пояснювальної записки і графічної частини та вимоги до їх оформлення. Розглянуто методіку розрахунку нелінійних електричних кіл та приклади їх розрахунку графоаналітичним методом. Наведено приклади рішення типових задач.

ЗМІСТ

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧ-	
НИХ КІЛ	4
ГРАФОАНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙ-	
НИХ ЛАНЦЮГІВ	7
ПРИКЛАДИ ГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НЕЛІ-	
НІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ	11
ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ	15
ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ	19
ЛІТЕРАТУРА	37

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Нелінійними називаються ланцюги, до складу яких входить хоча б один нелінійний елемент. Нелінійними називаються елементи, параметри яких залежать від величин, пов'язаних з цими елементами змінних (напруги, струму, магнітного потоку, заряду, температури, світлового потоку та ін.) Нелінійні елементи описуються нелінійними характеристиками, які, найчастіше, не мають строгого аналітичного виразу, визначаються експериментально і задаються таблично або графіками.

Нелінійні елементи можна розділити на двох - і **багатополюсні, керовані і некеровані, інерційні та безінерційні, з симетричними і несиметричними характеристиками, з монотонними і немонотонними характеристиками.**

Двохполюсні мають два полюси. *Багатополюсні* містять три (напівпровідникові і електронні тріоди) і більш (магнітні підсилювачі, багатообмоткові трансформатори, тетроди, пентоди та ін.) полюсів, за допомогою яких вони під'єднуються до електричного ланцюга. Характерною особливістю багатополюсних елементів є те, що в загальному випадку їх властивості визначаються *сімейством характеристик*, що представляють залежності вихідних характеристик від вхідних змінних і навпаки: вхідні характеристики будують для ряду фіксованих значень одного з вихідних параметрів, вихідні - для ряду фіксованих значень одного з вхідних.

Керовані нелінійні елементи (зазвичай трьох-і багатополюсні) містять керуючі канали, в яких, змінюючи напругу, струм, світловий потік та ін., змінюють їх основні характеристики: вольт-амперну, вебер-амперну або кулон-вольтную. *Некеровані* не мають керуючих каналів.

Інерційні елементи, у яких характеристики залежать від швидкості зміни діючого параметру. Для таких елементів *статичні* характеристики, що визначають залежність при повільній зміні змінних, відрізняються від *дина-*

мічних характеристик, що встановлюють залежність при швидкій зміні змінних. **Безінерційні** елементи, характеристики яких не залежать від швидкості зміни діючого параметру. Для таких елементів статичні і динамічні характеристики співпадають.

Елемент з **симетричною характеристикою** - це елемент у якого характеристика не залежить від напрямку визначальних її величин, тобто має симетрію відносно початку системи координат: $f(x) = -f(-x)$. Елемент з **несиметричною характеристикою** - це елемент у якого характеристика залежить від напрямку визначальних її величин, тобто не має симетрії відносно початку системи координат: $f(x) \neq -f(-x)$.

В елементі з **монотонною характеристикою** кожному значенню x відповідає єдине значення y і навпаки. В елементі з **немонотонною характеристикою** певним значенням x може відповідати два або більше значення y або навпаки.

У нелінійних резисторів неоднозначність характеристики зазвичай пов'язана з наявністю падаючої ділянки, а у нелінійних індуктивних і ємнісних елементів - з гістерезисом.

Основні параметри нелінійних ланцюгів можна розглянути на прикладі нелінійного резистивного елемента. У зв'язку з відсутністю у нелінійних резисторів прямої пропорційності між напругою і струмом їх не можна охарактеризувати одним параметром (одним значенням). Співвідношення між цими величинами в загальному випадку залежать не тільки від їх миттєвих значень, але і від похідних і інтегралів за часом.

Залежно від умов роботи нелінійного резистора і характеру завдання розрізняють статичний, диференціальний та динамічний опори.

Статичний опір - це відношення напруги на резистивному елементі в робочій точці до струму, що протікає через нього. Зокрема для точки 1 ВАХ на рис. 1

$$R_{c\partial} = \frac{U_1}{I_1} \square \operatorname{tg} \alpha.$$

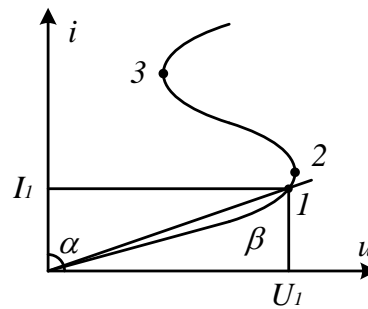


Рис. 1

Диференційний опір – це відношення нескінченно малого приросту напруги до відповідного приросту струму в заданій робочій точці.

$$R_{\dot{a}} = \frac{du}{di} \square \operatorname{tg} \beta.$$

Динамічний опір вводиться у разі інерційного нелінійного резистора і визначається за динамічною ВАХ

$$R_{\ddot{a}\dot{e}t} = \frac{du}{di},$$

Електричний стан нелінійних ланцюгів описується на підставі законів Кірхгофа, які мають загальний характер. Але для нелінійних ланцюгів принцип накладання непридатний. У цьому зв'язку методи розрахунку, розроблені для лінійних схем на основі законів Кірхгофа та принципу накладання, у загальному випадку не поширюються на нелінійні ланцюги.

Загальних методів розрахунку нелінійних ланцюгів не існує. Відомі прийоми і способи мають різні можливості і області застосування. У загальному випадку при аналізі нелінійного кола, система нелінійних рівнянь, що описує дане коло, може бути вирішена наступними методами: графічними; аналітичними; графо-аналітичними; ітераційними.

ГРАФІЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ

При використанні цих методів завдання вирішується шляхом графічних побудов на площині. При цьому характеристики всіх гілок ланцюга слід записати у функції одного загального аргументу. Завдяки цьому система рівнянь зводиться до одного нелінійного рівняння з одним невідомим.

Формально при розрахунку розрізняють ланцюги з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням.

Ланцюги з послідовним з'єднанням резистивних елементів.

Оскільки при послідовному з'єднанні елементів загальна напруга ланцюга дорівнює сумі напруг на елементах, загальна ВАХ може бути отримана підсумовуванням ВАХ елементів по осі напруг. Тоді, при заданому U_0 легко визначити струм I_0 і напруги U_1 і U_2 .

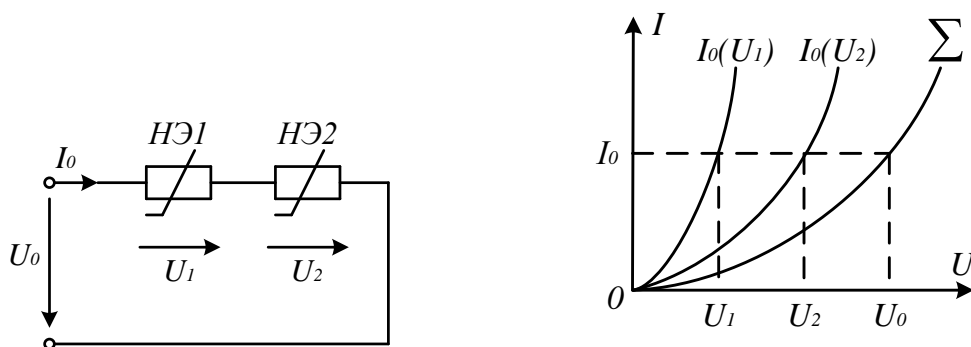


Рис. 1.

При послідовному з'єднанні нелінійних резисторів в якості загального аргументу приймається струм, що протікає через послідовно з'єднані елементи. Розрахунок проводиться в такій послідовності.

По заданих ВАХ $U_i(I)$ окремих резисторів в системі декартових координат $U - I$ будується результуюча залежність $U(I) = \sum U_i(I)$. Потім на осі напруг відкладається точка, відповідна в обраному масштабі заданій величині напруги на вході ланцюга, з якої відновлюється перпендикуляр до перети-

ну з залежністю $U(I)$. З точки перетину перпендикуляра з кривою $U(I)$ опускається ортогональ на вісь струмів - отримана точка відповідає шуканому струму в ланцюзі, по знайденому значенню якого з використанням залежностей $U_i(I)$ визначаються напруги на окремих резистивних елементах.

Застосування зазначеної методики для ланцюга на рис. 2, а ілюструють графічні побудови на рис. 2, б.

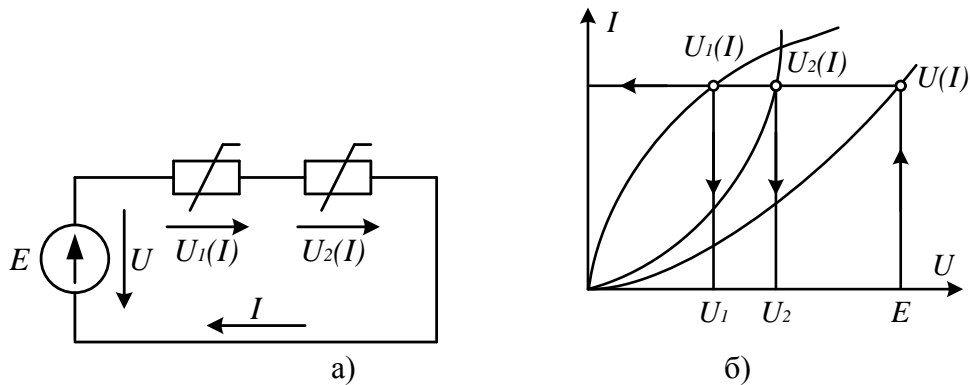


Рис. 2

Метод пересікання

У цьому випадку один з нелінійних резисторів, наприклад, з ВАХ $U_1(I)$ на рис. 2, а, вважається внутрішнім опором джерела з ЕРС E , а інший - навантаженням. Тоді на підставі співвідношення $E - U_1(I) = U_2(I)$ точка а (див. рис. 3) перетину кривих $E - U_1(I)$ і $U_2(I)$ визначає режим роботи ланцюга. Крива $E - U_1(I)$ будується шляхом віднімання абсцис ВАХ $U_1(I)$ з ЕРС E для різних значень струму.

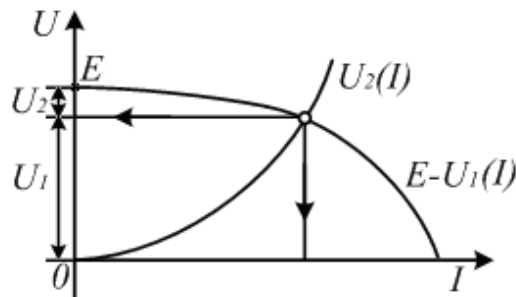


Рис. 3.

Використання даного методу найбільш раціонально при послідовному з'єднанні лінійного та нелінійного резисторів. У цьому випадку лінійний резистор приймається за внутрішній опір джерела, і лінійна ВАХ останнього будується по двох точках.

Ланцюги з паралельним з'єднанням резистивних елементів

При паралельному з'єднанні загальна ВАХ ланцюга виходить підсумовуванням ВАХ елементів по осі струмів.

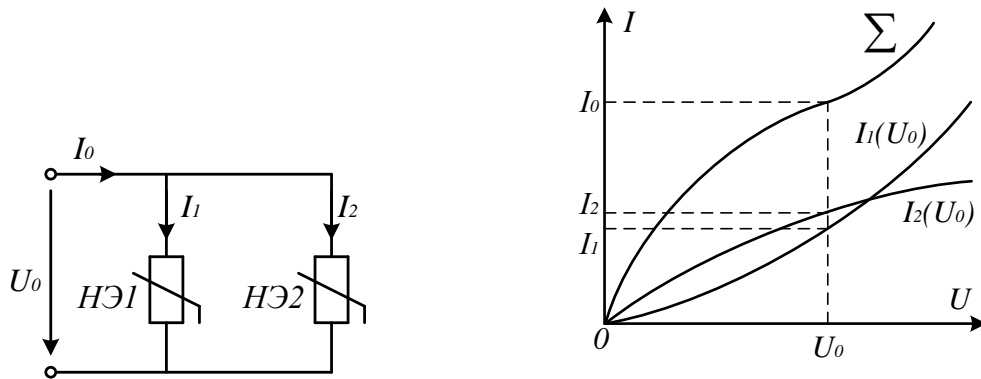


Рис. 4

Тобто, при паралельному з'єднанні нелінійних резисторів в якості загального аргументу приймається напруга, прикладена до паралельно з'єднаних елементів. Розрахунок проводиться в такій послідовності.

По заданих ВАХ $I_i(U)$ окремих резисторів в системі декартових координат $U - I$ будується результуюча залежність $I(U) = \sum I_i(U)$. Потім на осі струмів відкладається точка, відповідна в обраному масштабі заданій величині струму джерела на вході ланцюга (за наявності на вході кола джерела напруги завдання вирішується відразу шляхом відновлення перпендикуляра з точки, що відповідає заданому напрузі джерела, до перетину з ВАХ $I_i(U)$, з якої відновлюється перпендикуляр до перетину з залежністю $I(U)$). З точки

перетину перпендикуляра з кривою опускається перпендикуляр на вісь напруг - отримана точка відповідає напрузі на нелінійних резисторах, по знайденому значенню якого з використанням залежностей $I_i(U)$ визначаються струми в гілках з окремими резистивними елементами. Використання даної методики для ланцюга рис. 4, а ілюструють графічні побудови на рис. 4, б.

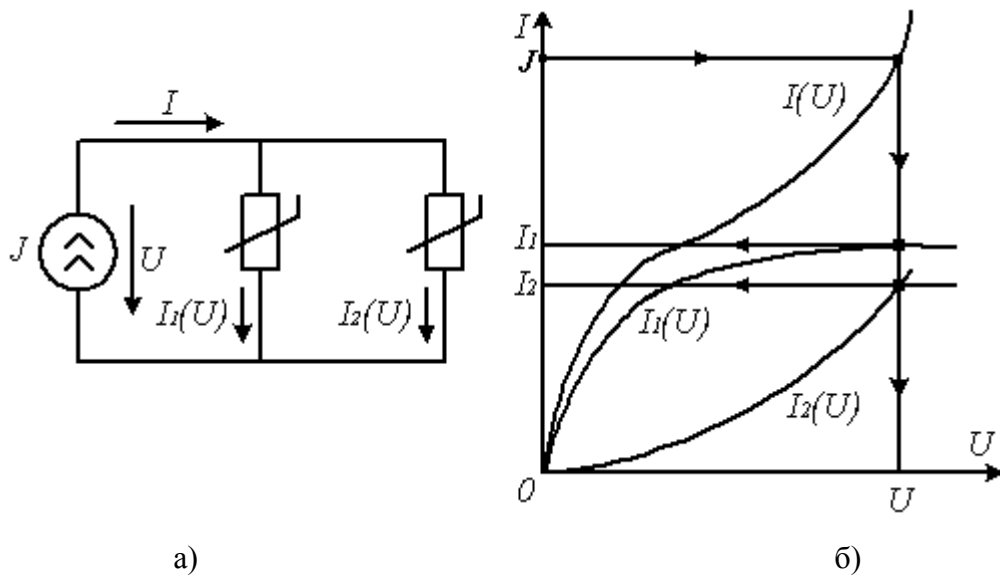


Рис. 4.

Ланцюги з послідовно-паралельним (змішаним) з'єднанням резистивних елементів

Розрахунок таких ланцюгів проводиться в такій послідовності:

1. Початкова схема зводиться до ланцюга з послідовним з'єднанням резисторів, для чого будується результуюча ВАХ паралельно з'єднаних елементів, як це показано в пункті б).
2. Проводиться розрахунок отриманої схеми з послідовним з'єднанням резистивних елементів (див. пункт а), на підставі якого потім визначаються струми у вихідних паралельних гілках

ПРИКЛАДИ ГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГІВ

Розглянемо розрахунок найпростіших резистивних ланцюгів, що містять нелінійні елементи, графічними методами. При цьому слід мати на увазі, що в ряді випадків можна обійтися без побудови сумарних ВАХ гілок або схеми в цілому.

Приклад 1

Визначити напругу U , при якому $U_R = U_{HE}$ для схеми (рис. 5), де $R = 20$ Ом. ВАХ HE наведено на рис.

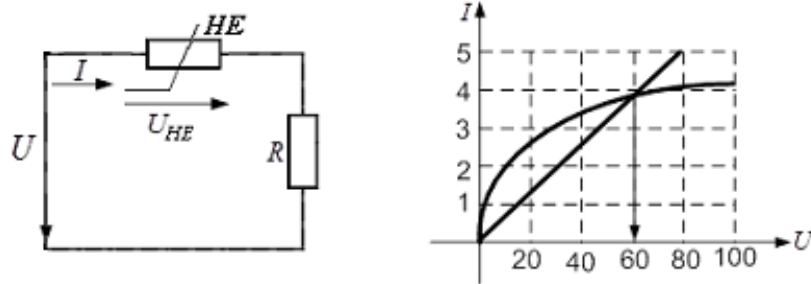


Рис. 6

1. Побудуємо характеристику $U_R(I) = I \cdot R$.
2. У точці перетину вольт-амперних характеристик лінійного і нелінійного елементів напруги на цих елементів рівні (елементи з'єднані послідовно, і струм один і той же): $U_R = U_{HE} = 60 \text{ В}$.
3. Відповідно до закону Кірхгофа отримаємо: $U = U_R + U_{HE} = 120 \text{ В}$.

Приклад 2

Визначити всі струми для схеми (рис. 7), де $E_2 = -20 \text{ В}$, $U = 50 \text{ В}$. Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів представлені на рис.

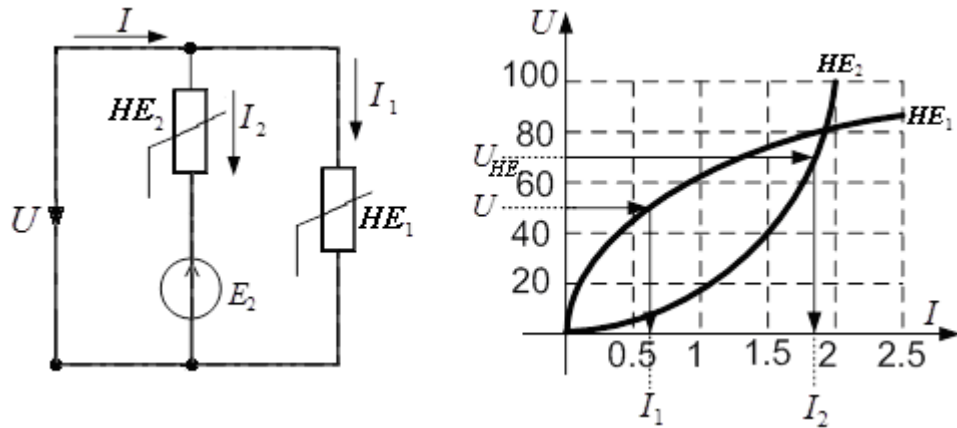


Рис. 7.

1. Так як напруга U є також напругою на першому нелінійному елементі, то по ВАХ цього елемента визначаємо струм в ньому: $I_1 \cong 0.6 \text{ A}$.

2. Для визначення струму в другій гілці необхідно знайти напругу на другому нелінійному елементі. У відповідності з рівнянням $-E_2 = U_{I A_2} - U$ отримаємо $U_{I A_2} = U - E_2 = 70 \text{ B}$. Отже, $I_1 \cong 1.8 \text{ A}$.

3. Струм в нерозгалуженій частині схеми дорівнює: $I = I_1 + I_2 \cong 2.4 \text{ A}$.

Приклад 3

Визначити напругу, підключену до схеми (рис. 2.8), де напруга на паралельній ділянці ланцюга $U_{23} = 50 \text{ B}$.

Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів представлені на рис. 8 б.

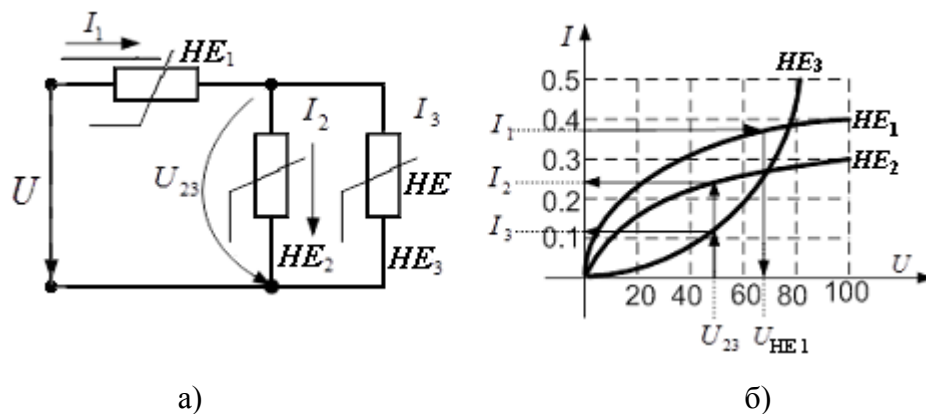


Рис. 8

1. Користуючись ВАХ нелінійних елементів HE_2 и HE_3 , напруга на яких задано, визначаємо струми в цих гілках $I_2 \cong 0.24 \text{ A}$, $I_3 \cong 0.12 \text{ A}$.
2. Визначаємо струм в HE_1 $I_1 = I_2 + I_3 \cong 0.36 \text{ A}$.
3. По ВАХ HE_1 визначаємо напругу на цьому елементі $U_{fA_1} \cong 68 \text{ B}$.
4. Отже, $U = U_{fA_1} + U_{23} \cong 118 \text{ B}$.

Приклад 4

Визначити струми для схеми (рис. 9), де $R = 30 \text{ Ом}$, напруга $U_{fA_1} = 50 \text{ B}$ та задана вольт-амперна характеристика однакових нелінійних елементів.

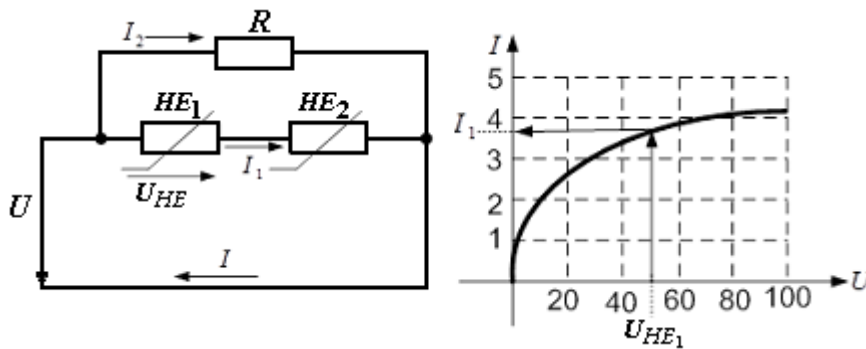


Рис. 9

1. Струм I_1 визначаємо по ВАХ НЕ, так як напруга на ньому відома, то $I_1 \cong 3.7 \text{ A}$.
2. Так як НЕ однакові, то $U_{fA_1} = U_{fA_2}$. Отже, напруга на опорі R і струм в цій гілці відповідно дорівнюють: $2U_{fA} = U = 100 \text{ B}$, $I_2 \cong 3.3 \text{ A}$.
3. Струм $I = I_1 + I_2 \cong 7 \text{ A}$.

Приклад 5

Для схеми (рис. 2.9) дано: напруга $U = 70 \text{ B}$ вольт-амперна характеристика однакових нелінійних елементів (рис. 2.10). Визначити струми.

1. Струм I_2 визначаємо по ВАХ НЕ, так як напруга на ньому відома:
 $I_2 \cong 1.8 \text{ A}$.
2. Так як НЕ однакові, то напруга на кожному з двох послідовно з'єднаних НЕ дорівнюють $0.5U = 35 \text{ В}$. Отже, струм $I_1 = 1.4 \text{ А}$.
3. Струм $I = I_1 + I_2 = 3.2 \text{ А}$.

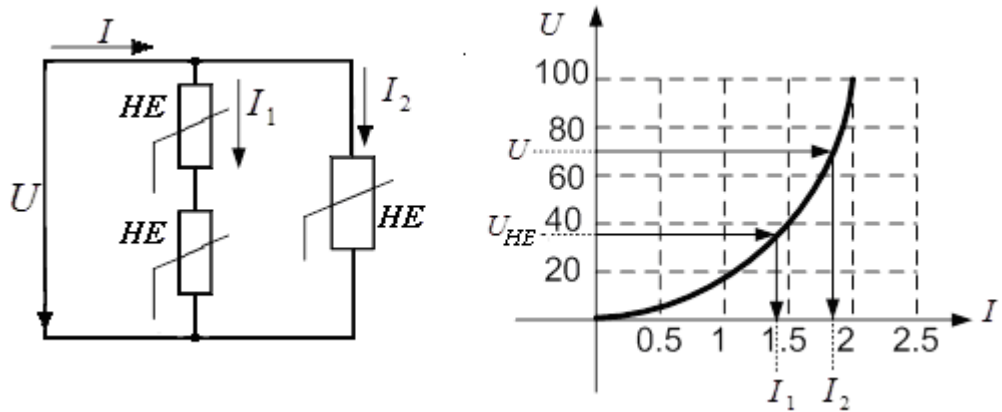


Рис. 10

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

1. Побудувати графік вольт-амперної характеристики (ВАХ) заданого нелінійного елемента (НЕ).

2. Провести кусочно - лінійну апроксимацію ВАХ НЕ і скласти його дискретно-лінійну схему заміщення, вказавши параметри елементів еквівалентної схеми.

3. Побудувати сумарну ВАХ нелінійного ланцюга для вказаних параметрів елементів з урахуванням ВАХ НЕ.

4. Для вказаної в завданні вхідної напруги E з побудованих характеристик визначити режим роботи усіх елементів нелінійного ланцюга. Результати звести до таблиці.

5. В розрахованій робочій точці для нелінійного елемента, двополюсника R_2 - НЕ, а також досліджуваного ланцюга обчислити:

а) статичний опір $r_{ст}$;

б) диференційний опір $r_{диф}$;

в) відносний диференційний опір $r_{диф}^* = \frac{r_{диф}}{r_{ст}}$.

Результати звести до таблиці.

6. Розрахувати режим роботи усіх елементів досліджуваного ланцюга методом пересікання. Результати звести до таблиці і порівняти з результатами, отриманими в п. 4.

7. Скласти лінеаризовану еквівалентну схему НЕ для режиму малих сигналів відносно розрахованої робочої точки. Визначити параметри елементів еквівалентної схеми. Навести еквівалентну лінеаризовану схему електричного ланцюга і вказати параметри її елементів.

8. Використовуючи графіки, одержані в п. 3 побудувати передавальні характеристики досліджуваного ланцюга:

$$U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}});$$

$$I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}});$$

при зміні напруги на вході від $-1,5E$ до $+1,5E$.

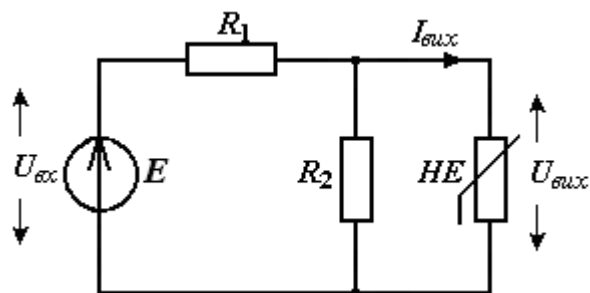
9. Побудувати узгоджені часові діаграми струмів та напруг в елементах електричного ланцюга при дії на вході синусоїдальної напруги $u(t) = U_m \sin \omega t$ для двох випадків:

а) $U_m = 0.5 E$;

б) $U_m = 1.5 E$.

10. Зробити висновки.

Схема нелінійного ланцюга



Вид нелінійного елемента

варіант група	парний	непарний
ДЕ, ДС - _1	а	б
ДЕ, ДС - _2	б	а



а)



б)

ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЛІНІЙНОГО ЛАНЦЮГА

№ вар. .	НЕ (стабілітро н)	R_1 [Ом]	R_2 [Ом]	E [В]		№ вар.	НЕ (стабілітрон)	R_1 [Ом]	R_2 [Ом]	E [В]
1	Д814А	800	2400	16		17	Д817Б	1800	5400	130
2	Д814Б	900	2700	18		18	Д817В	2400	7200	160
3	Д814В	1000	3000	20		19	Д817Г	3000	9000	200
4	Д814Г	1100	3300	22		20	КС433А	60	180	7
5	Д814Д	1200	3600	24		21	КС439А	80	240	8
6	КС133А	200	600	7		22	КС447А	90	300	9
7	КС139А	210	700	8		23	КС456А	100	330	11
8	КС147А	220	800	9		24	КС468А	120	360	13
9	КС156А	230	900	10		25	КС482	140	420	16
10	КС168А	240	1000	12		26	КС510А	300	900	20
11	Д816А	400	1200	44		27	КС512А	360	1100	24
12	Д816Б	500	1500	54		28	КС515А	450	1300	30
13	Д816В	600	1800	66		29	КС518А	550	1600	36
14	Д816Г	700	2000	78		30	КС522А	650	1900	44
15	Д816Д	900	2700	94		31	КС620А	4000	12000	240
16	Д817А	1500	4500	110		32	КС650А	5000	15000	300

Примітка: параметри стабілітронів можна знайти в довіднику «Справочник по полупроводниковым приборам». Лавриненко В.Ю. – К.: Техніка, 1980 на с. 129 .. 133 або у інших довідниках.

ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Побудова графіка ВАХ НЕ

Графіки ВАХ стабілітронів можна знайти в деяких довідниках. Якщо в довіднику немає графіка ВАХ заданого стабілітрона, її можна побудувати, використовуючи параметри стабілітрона, які наведені у довідниках.

Для побудови графіка треба знати такі параметри стабілітрона:

- напругу стабілізації $U_{ст}$;
- диференційний опір $r_{ст}$;
- мінімальний струм стабілізації $I_{ст. min}$;
- максимальний струм стабілізації $I_{ст. max}$;

На рис. 11 наведено графік ВАХ стабілітрона, побудований з використанням його основних параметрів.

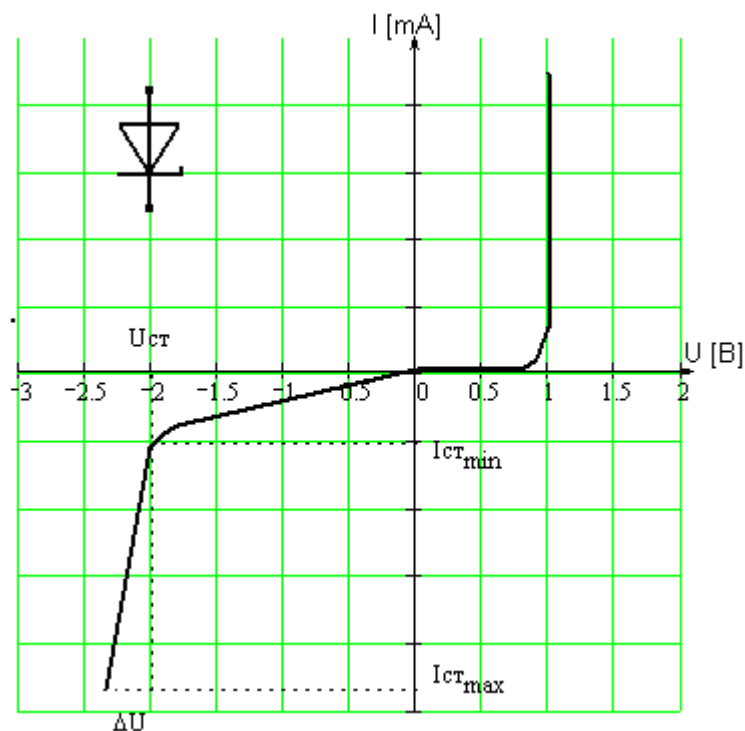


Рис. 11

Нахил зворотної гілки ВАХ стабілітрона визначається його диференційним опором $r_{ст}$:

$$\Delta U = r_{\text{ст}} (I_{\text{ст. max}} - I_{\text{ст. min}})$$

Оскільки ВАХ стабілітрона є несиметричною, графік його ВАХ буде залежати від полярності включення стабілітрона відносно джерела живлення.

Якщо як НЕ використовується послідовне з'єднання двох стабілітронів, графіком ВАХ НЕ буде графік сумарної ВАХ послідовно з'єднаних стабілітронів з урахуванням їх зустрічного включення.

Надалі, приклад виконання розрахунково-графічної роботи будемо розглядати, використовуючи нелінійний елемент, ВАХ якого наведена на рис. 12.

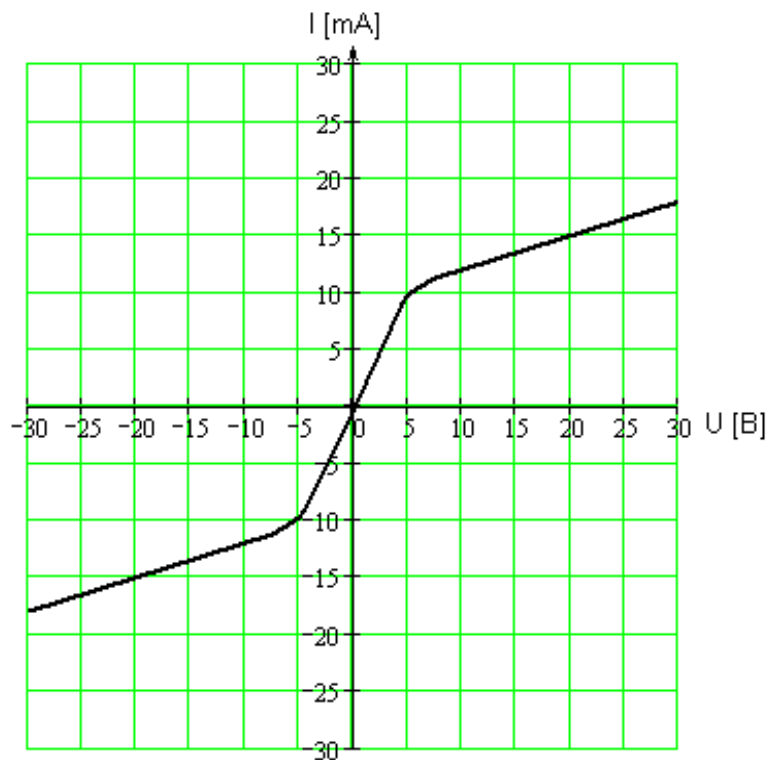


Рис. 12

Схема електричного ланцюга, на якій вказано параметри елементів, наведена на рис. 13.

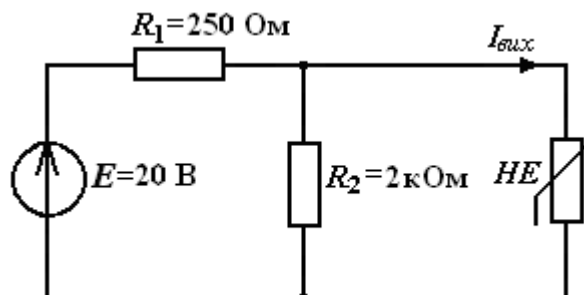


Рис.13

2. Кусочно-лінійна апроксимація ВАХ не та його дискретно-лінійна схема заміщення

Апроксимуємо ВАХ НЕ трьома лінійними ділянками (рис. 14).

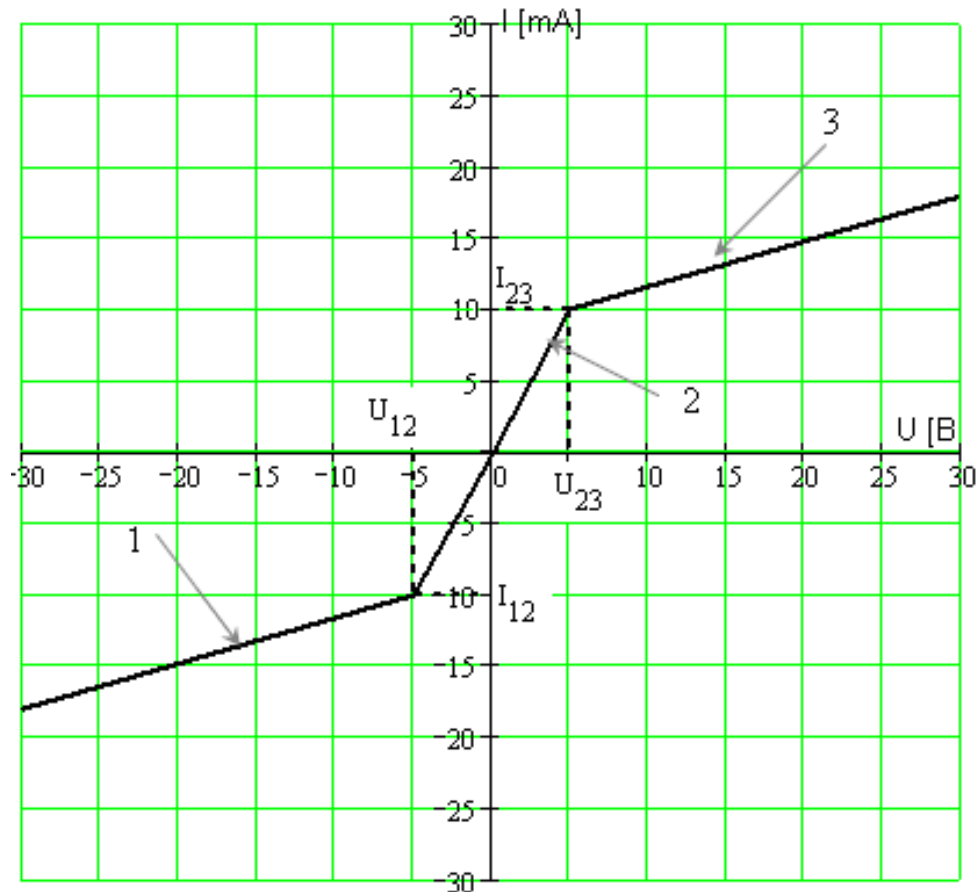


Рис. 14

Зафіксуємо координати початкової і кінцевої точки кожної лінійної ділянки (табл. 1). Кожній лінійній ділянці поставимо у відповідність гілку електричного кола, складену з лінійних елементів. Якщо ці гілки за допомогою ключів по чергово вмикає в електричне коло замість НЕ у відповідності з табл. 1 можна здійснювати розрахунок нелінійного ланцюга використовуючи методи розрахунку лінійних ланцюгів. При цьому похибка розрахунків буде визначатися точністю апроксимації ВАХ НЕ. Дискретно-лінійна схема заміщення НЕ наведена на рис. 15.

Опори резисторів r_1 , r_2 , r_3 дорівнюють диференційному опору відповідної лінійної ділянки (табл. 2).

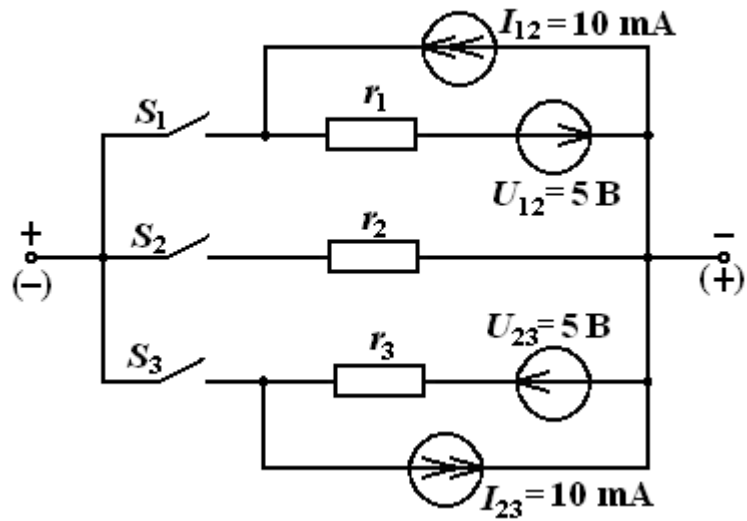


Рис. 15

Таблиця 1

ключі	Напруга, [В]		Струм, [мА]	
	min	max	min	max
S_1	$-\infty$	$U_{12} = -5$	$-\infty$	$I_{12} = -10$
S_2	$U_{12} = -5$	$U_{23} = 5$	$I_{12} = -10$	$I_{23} = 10$
S_3	$U_{23} = 5$	∞	$I_{23} = 10$	∞

Таблиця 2

Опір	r_1	r_2	r_3
Значення [Ом]	2970	500	2970

3. Побудова сумарної ВАХ для нелінійного ланцюга

Будуємо в одній системі координат ВАХ НЕ та резисторів R_1 та R_2 . Потім будуємо сумарну ВАХ НЕ та R_2 (ВАХ $R_2 \parallel \text{НЕ}$), які з'єднані паралельно, шляхом додавання струмів при фіксованих значеннях напруги.

Після цього будуємо сумарну ВАХ електричного ланцюга, шляхом додавання напруг резистора R_1 та ділянки $R_2 \parallel \text{НЕ}$ при фіксованих значеннях струму.

Графічні побудови наведено на рис. 16.

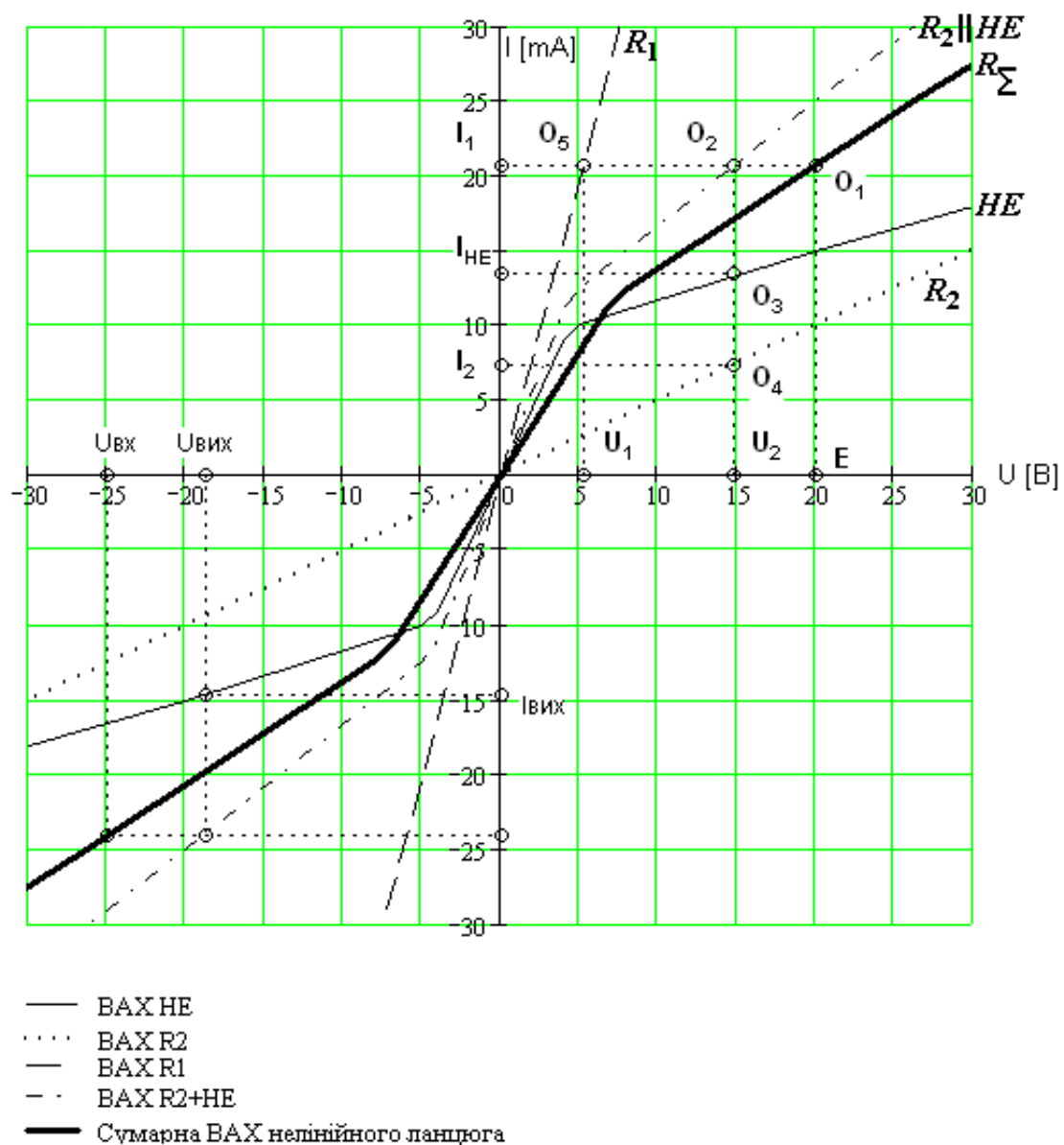


Рис. 16

4. Визначення режиму роботи елементів нелінійного ланцюга при заданій напрузі джерела живлення $E = 20$ В.

По заданій напрузі джерела живлення $E = 20$ В визначаємо робочу точку O_1 на сумарній ВАХ. Ця точка визначає струм джерела живлення I_1 , а отже і струм резистора R_1 .

Точка перетину (O_5) струму I_1 з ВАХ резистора R_1 визначає напругу на цьому резисторі U_1 .

Точка перетину (O_2) струму I_1 з характеристикою ділянки $R_2 \parallel \mathbf{HE}$ визначає напругу U_2 на резисторі R_2 та \mathbf{HE} .

У точках перетину напруги U_2 з характеристиками \mathbf{HE} (O_3) та R_2 (O_4) знаходимо відповідно струми через ці елементи. Чисельні значення цих струмів та напруг зведені до табл. 3.

Таблиця 3

	R_1	R_2	\mathbf{HE}
U [В]	$U_1 = 5,25$	$U_2 = 14,75$	$U_{\mathbf{HE}} = 14,75$
I [mA]	$I_1 = 20,68$	$I_2 = 7,3$	$I_{\mathbf{HE}} = 13,38$

Перевірка одержаних результатів здійснюється з використанням законів Ома та Кірхгофа:

$$I_1 = I_2 + I_{\mathbf{HE}} = 7,3 + 13,38 = 20,68 \text{ мА};$$

$$E = U_1 + U_2 = 5,25 + 14,75 = 20 \text{ В};$$

$$U_2 = U_{\mathbf{HE}} = 14,75 \text{ В}.$$

5. Визначення основних параметрів НЕ в робочій точці

В результаті попередніх розрахунків ми визначили робочу точку НЕ (O_3), а також робочі точки на сумарній ВАХ (O_1) і характеристиці паралельної ділянки ВАХ $R_2||\text{НЕ}$ (O_2).

Визначаємо статичний опір $\frac{U_0}{I_0}$, а також диференційний опір $\frac{\Delta U_0}{\Delta I_0}$ у вказаних робочих точках.

Для кожної точки розраховуємо відносний диференційний опір $r_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{o}}^* = \frac{r_{\ddot{a}\ddot{e}\ddot{o}}}{r_{\ddot{n}\ddot{o}}}$.

Одержані результати зводимо до табл. 4

Таблиця 4

	НЕ (точка O_3)	$R_2 \text{НЕ}$ (точка O_2)	$R_1 + R_2 \text{НЕ}$ (точка O_1)
$r_{\text{ст}}, \text{Ом}$	$\frac{U_{\dot{I}\dot{A}}}{I_{\dot{A}}} = \frac{14,75}{0,01338} = 1102$	$\frac{U_2}{I_1} = \frac{14,75}{0,02968} = 713$	$\frac{E}{I_1} = \frac{20}{0,02068} = 967$
$r_{\text{диф}}, \text{Ом}$	$\Delta U_{HE} / \Delta I_{HE} = 2970$	$\Delta U_2 / \Delta I_1 = 1000$	$\Delta \dot{A} / \Delta I_1 = 1500$
$r_{\text{диф}}^*$	2,70	1,41	1,55

6. Розрахунок режиму роботи усіх елементів ланцюга методом пересікання

Виокремимо нелінійний елемент, а лінійну частину схеми представимо у вигляді еквівалентного генератора (рис. 17)

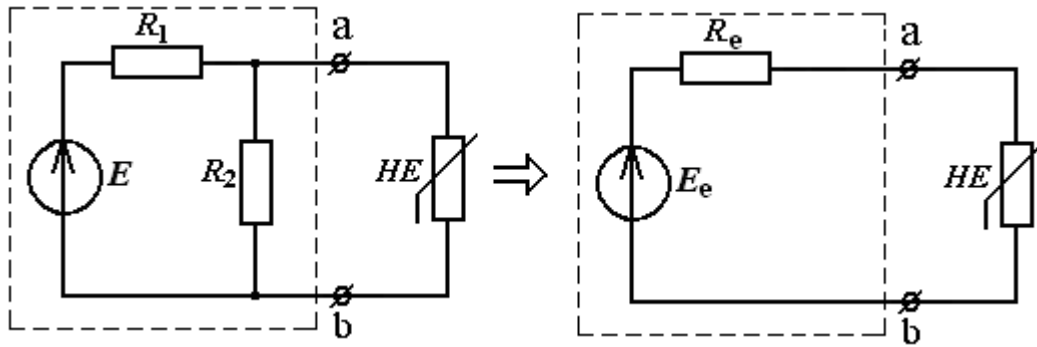


Рис. 17

Напругу еквівалентного генератора E_e визначаємо як напругу холостого ходу між точками ab , а його внутрішній опір r_e - як еквівалентний опір між точками ab в режимі холостого ходу при закороченому джерелі напруги E .

$$E_a = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \frac{2000}{250 + 2000} = 17,78 \text{ В.}$$

$$r_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{250 \cdot 2000}{250 + 2000} = 222,22 \text{ Ом.}$$

Будуємо графік робочої ділянки ВАХ НЕ (рис. 18).

На вісі струмів відкладаємо значення $I = E_e / r_e$, а на вісі напруг $U = E_e$. З'єднавши ці точки прямою лінією в точці перетину з ВАХ НЕ (O_3) визначаємо режим його роботи :

$$I_{HE} = 13,36 \text{ мА,}$$

$$U_{HE} = U_2 = 14,74 \text{ В.}$$

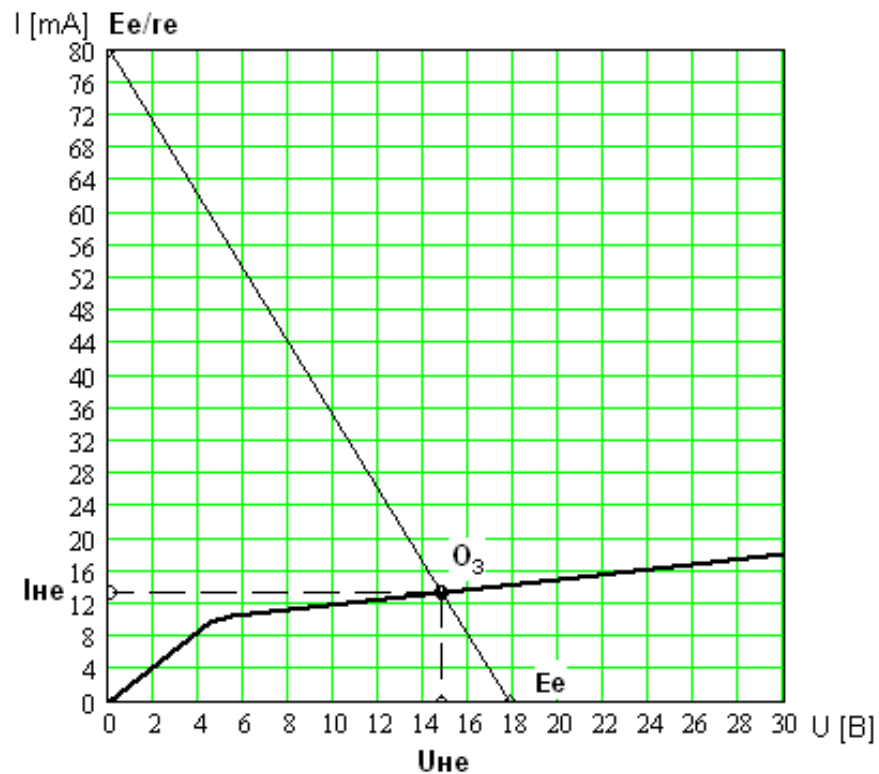


Рис. 18

Після цього повертаємося до вихідної схеми і за допомогою законів Ома та Кірхгофа визначаємо режим роботи усіх інших елементів:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{14,74}{2000} = 7,37 \text{ мА};$$

$$I_1 = I_2 + I_{HE} = 7,37 + 13,36 = 20,73 \text{ мА};$$

$$U_1 = E - U_2 = 20 - 14,74 = 5,26 \text{ В}.$$

Одержані результати зведемо до табл. 5.

Таблиця 5

	R_1	R_2	HE
$U, \text{ В}$	$U_1 = 5,26$	$U_2 = 14,74$	$U_{HE} = 14,74$
$I, \text{ мА}$	$I_1 = 20,73$	$I_2 = 7,37$	$I_{HE} = 13,36$

Дані майже збігаються з даними табл. 3. Незначна похибка (< 1%) пов'язана з похибками графічної побудови і визначенням параметрів.

7. Еквівалентна лінеаризована схема для режиму малих сигналів

Будуємо ВАХ НЕ і на ній позначаємо робочу точку (O_3), визначену раніше (рис. 19).

Проводимо дотичну до ВАХ НЕ у робочій точці і продовжуємо її до пересікання з віссю струмів (J_Φ) та віссю напруг (E_Φ).

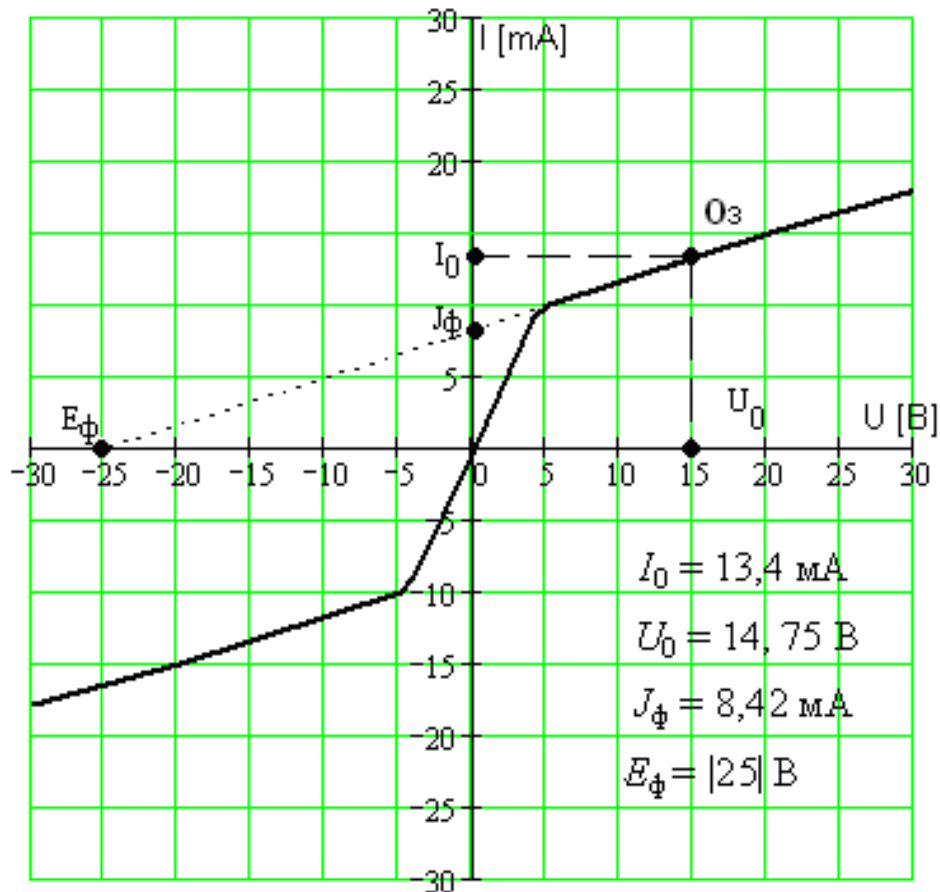


Рис. 19

Якщо відомо, що робоча точка буде переміщуватися по ВАХ НЕ на незначну відстань відносно початкової робочої точки O_3 , НЕ можна замінити еквівалентною лінійною схемою, побудованою з використанням джерела струму J_Φ , або джерела напруги E_Φ .

7.1. Еквівалентна схема з джерелом струму

Диференційний опір на робочій ділянці характеристики можна визначити з такого співвідношення:

$$r_{\dot{a}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_0}{I_0 - J_{\delta}} = \frac{14,75}{0,01338 - 0,00842} = 2970 \text{ Ом.}$$

Отже струм в околиці робочої точки можна приблизно визначити з такого співвідношення:

$$I = \frac{U}{r_{\dot{a}}} + J_{\delta},$$

якому відповідає еквівалентна схема наведена на рис. 20.

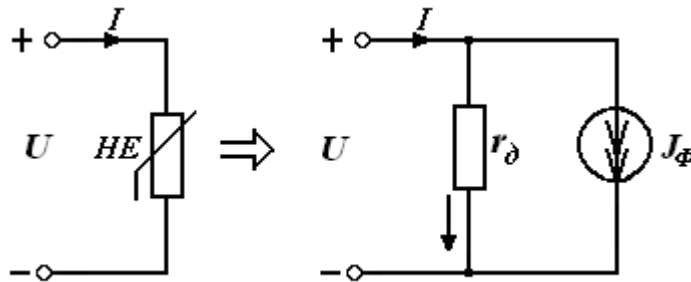


Рис. 20

7.2. Еквівалентна схема з джерелом напруги

Диференційний опір на робочій ділянці можна визначити з іншого співвідношення:

$$r_{\dot{a}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_0 + |E_{\delta}|}{I_0} = \frac{14,75 + 25}{0,01338} = 2970 \text{ Ом.}$$

Напругу в околиці робочої точки можна приблизно визначити з такого співвідношення:

$$U = I \cdot r_{\dot{a}} - |E_{\delta}|,$$

якому відповідає еквівалентна схема, наведена на рис. 21.

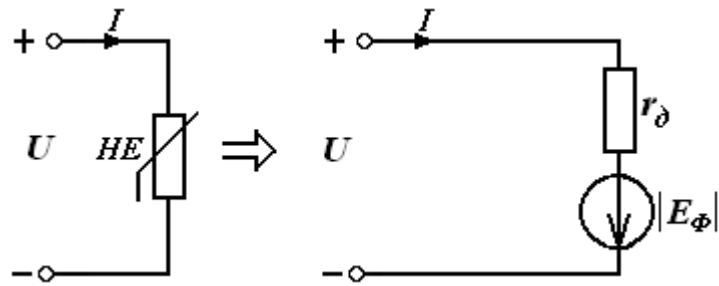


Рис.21

Якщо підставити одержані схеми заміщення НЕ у схеми електричного ланцюга, одержимо його еквівалентну лінійну схему для режиму малого сигналу (рис. 22 та рис. 23). Параметри еквівалентних схем зведені до табл. 6.

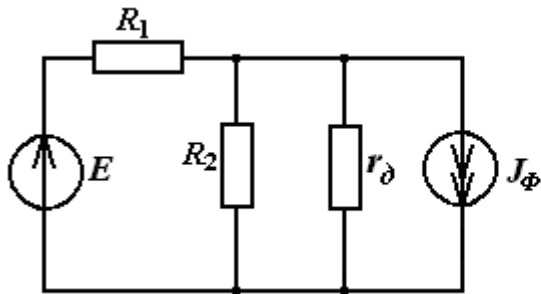


Рис. 22

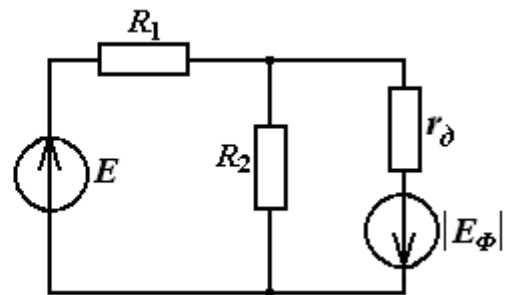


Рис.23

Таблиця 6

$E, \text{ В}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$r_d, \text{ Ом}$	$E_\phi, \text{ В}$	$J_\phi, \text{ мА}$
20	250	2000	2970	25	8,42

8. Побудова передавальних характеристик електричного ланцюга

На графіках (рис. 16) показано приклад визначення вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ та вихідного струму $I_{\text{вих}}$ при вхідній напрузі $U_{\text{вх}} = -25 \text{ В}$.

Аналогічно шукають $U_{\text{вих}}$ та $I_{\text{вих}}$ для інших значень вхідної напруги у проміжку від $U_{\text{вх}} = -1,5 E = -30 \text{ В}$ до $U_{\text{вх}} = 1,5 E = 30 \text{ В}$.

Зауваження: оскільки у цьому прикладі вольт-амперні характеристики є симетричними відносно початку системи координат, передавальні характеристики також будуть симетричними. Отже достатньо розглянути лише зміну вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ у проміжку від -30 В до 0 В . Одержані результати зведемо до табл. 7.

Таблиця 7

$U_{\text{вх}}$	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$U_{\text{вих}}$	24	22,4	20,6	18,9	17,2	15,5	13,8	12	10,1	8,4	6,7	4,8	3,4	2,1	0,8	0
$I_{\text{вих}}$	13	12,9	12,9	12,8	12,8	12,7	12,6	12,4	11,8	11,1	10,3	9,1	7,6	5,5	2,8	0

На рис. 24 наведено графік передавальної характеристики $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$, а на рис. 25 - $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$, побудовані за даними табл. 7.

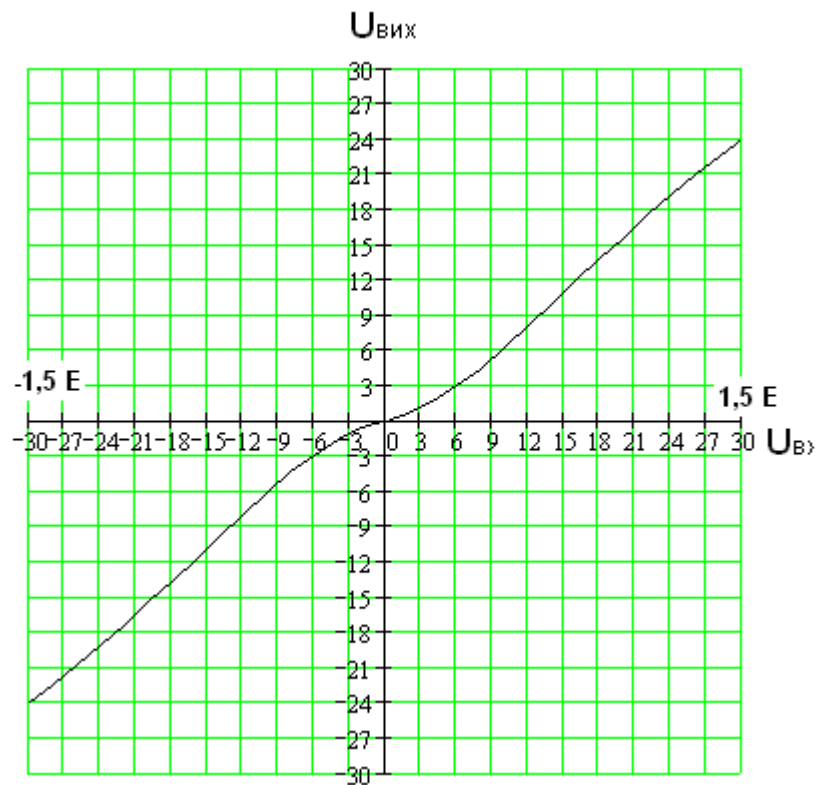


Рис. 24

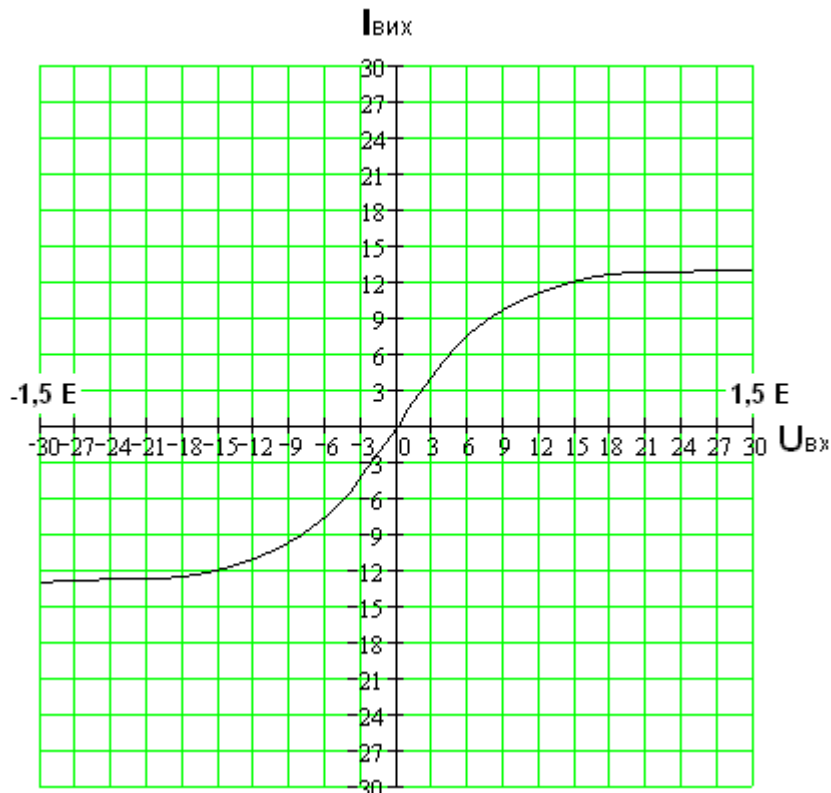


Рис. 25

9. Побудова узгоджених часових діаграм струмів та напруг в елементах ланцюга

Результати, одержані в попередніх пунктах, дозволяють графічно визначити форму струмів та напруг в усіх елементах електричного ланцюга при заданій формі вхідної напруги. Послідовність побудови графіків є такою:

9.1. За допомогою передавальної характеристики $U_{vix} = f(U_{vx})$ (рис. 24) методом проєкцій будуємо форму вихідної напруги при двох заданих значеннях вхідної напруги (рис. 26).

9.2. За допомогою передавальної характеристики $I_{vix} = f(U_{vx})$ (рис. 15) методом проєкцій будуємо форму вихідного струму $i_{vix}(t)$ при двох заданих значеннях вхідної напруги (рис. 27).

9.3. Будуємо форму напруги на резисторі R_1 , використовуючи другий закон Кірхгофа

$$u_{R1}(t) = u_{vx}(t) - u_{vix}(t)$$

для кожного значення вхідної напруги (рис. 18, 19).

9.4. Будуємо форму струму через резистори R_1 та R_2 , використовуючи закон Ома:

$$i_{R1} = \frac{u_{R1}(t)}{R_1}; i_{R2} = \frac{U_{R2}(t)}{R_2} = \frac{u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{R_2}.$$

Ці струми, а також струми $i_{\text{вих}}(t)$ одержані в п. 9.2, будуємо в одній системі координат для заданих значень U_m (рис. 30, 31). Для цих трьох струмів перевіряється виконання I - го з-ну Кірхгофа: $i_{R1}(t) = i_{R2}(t) + i_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}(t)$. У випадку невиконання цього закону, попередні розрахунки уточнюються.

Примітка. У випадку, що розглядається, передавальні характеристики є симетричними. Тому достатньо графічно побудувати лише один півперіод. Якщо передавальні характеристики є несиметричними, ведеться графічна побудова як позитивного, так і негативного півперіоду. Остаточні графіки струмів та напруг наводяться для повного періоду.

10. Висновки

Графічні методи розрахунку за своєю суттю є достатньо простими та наочними. Для проведення графічних розрахунків треба мати графік ВАХ нелінійного елемента, а також знати параметри усіх інших елементів електричного ланцюга. Точність графічних методів залежить від точності графічних побудов, а також складності електричного ланцюга. Оскільки графічні методи є графічним відображенням законів Ома та Кірхгофа, точність проведених розрахунків можна контролювати перевіряючи виконання цих законів. У цій роботі максимальна похибка одержаних результатів не перевищує 5 %.

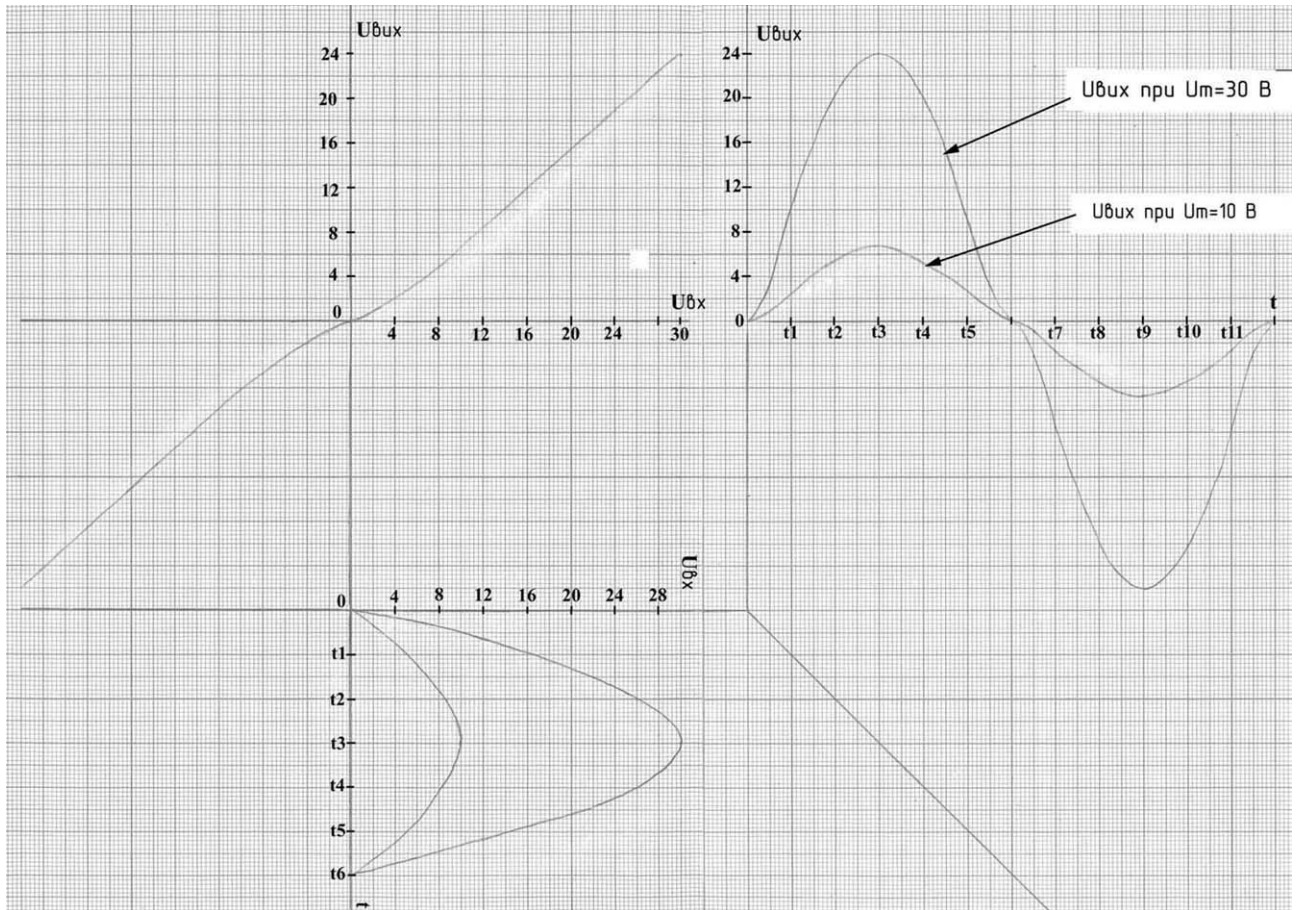


Рис.26

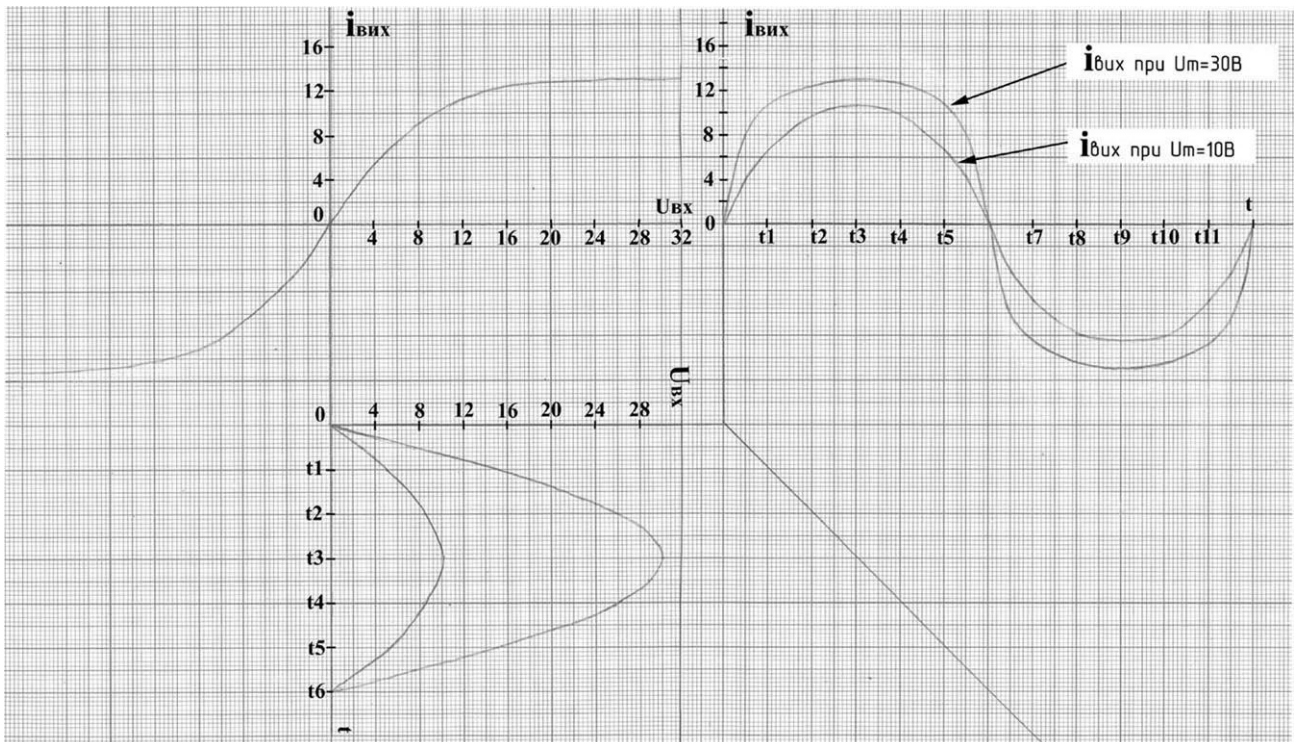


Рис. 27

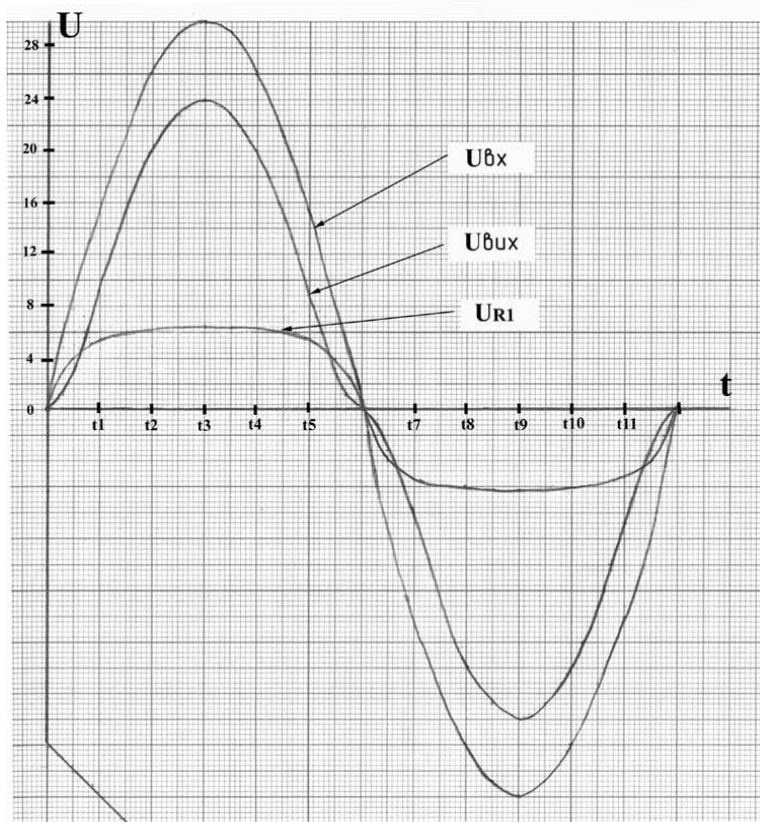


Рис.28 (графік у випадку $U_m = 30$ В)

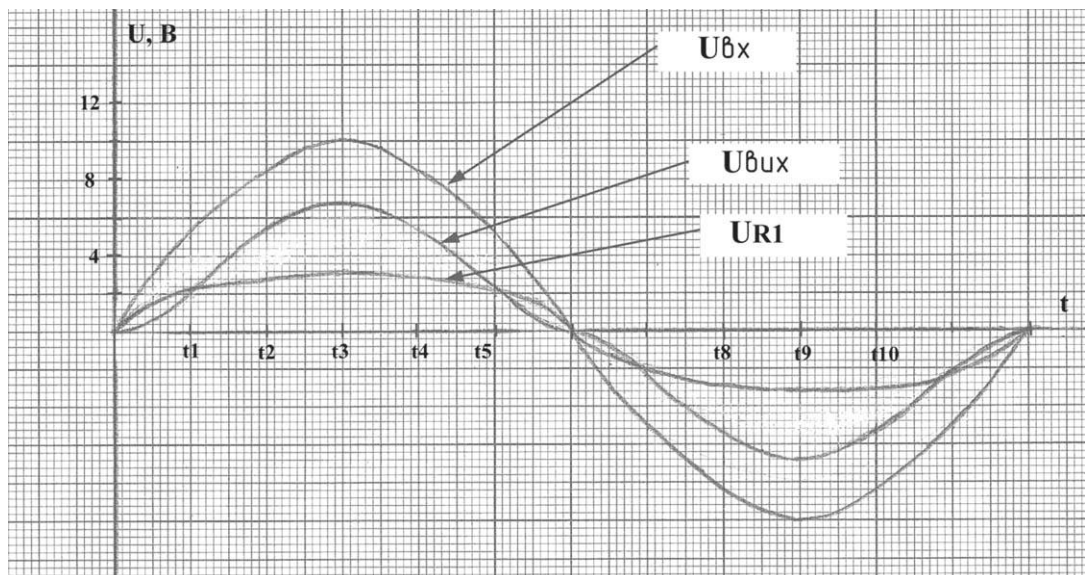


Рис.29 (графік у випадку $U_m = 10$ В)

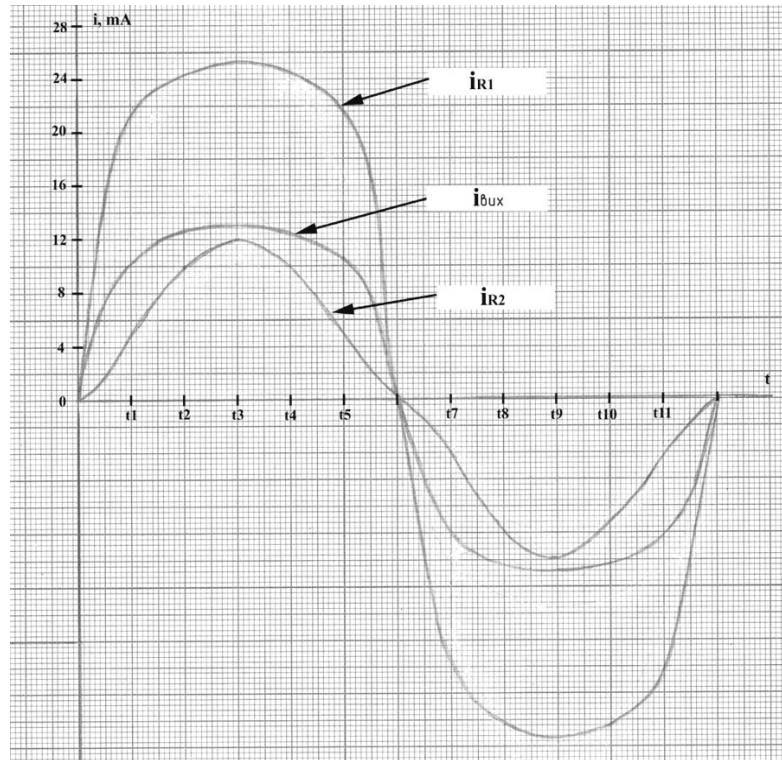


Рис.30 (графік у випадку $U_m = 30V$)

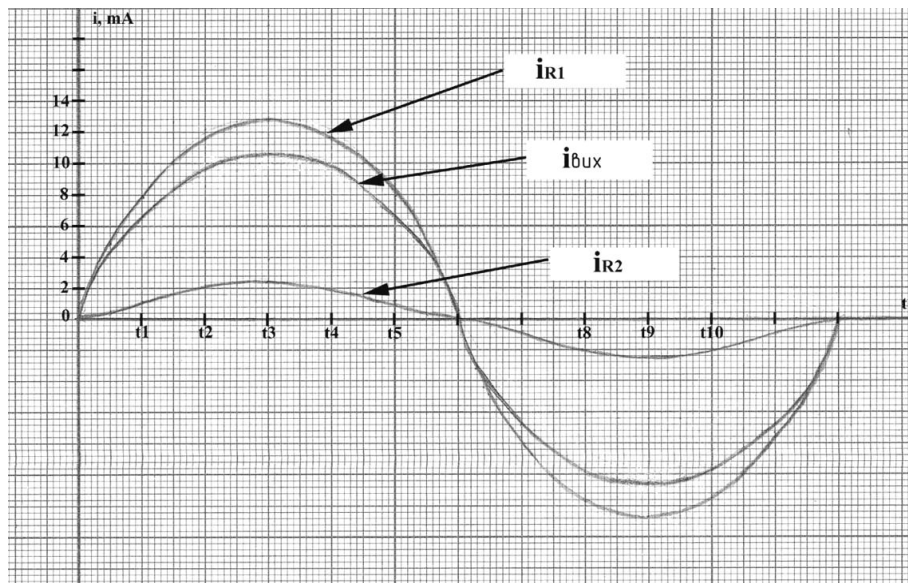


Рис.31 (графік у випадку $U_m = 10V$)

ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов. — М.: Радио и связь, 1982 — 280 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебн. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. / Л. А. Бессонов. — 9 – е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая шк., 1996. — 638 с. Библиогр.: с. 632. — На пер. Теоретические основы электротехники. — 10 000 экз. — ISBN 5-06-002160-2.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник. / Л. А. Бессонов. — 11 - е изд., перераб. и доп. — М.: «Гардарики» 2007. — 701 с. Библиогр.: с. 695. — На пер. Теоретические основы электротехники. — 5 000 экз. — ISBN 5-8297 - 0046 - 8.
4. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — с. 256. — ISBN: 5-283-04433-5.
5. Нейман Л.В., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. учеб. для вузов. Том 1. - 3-е изд., перераб. и доп. / Л. В. Нейман, К. С. Демирчян. - Л.: Энергоиздат, Ленингр. Отд-ние, 1981. — 536 с. — На пер. Теоретические основы электротехники. — 60 000 экз.
6. Основы анализа электрических цепей: нелинейные цепи [Текст] : учеб. для студ. электротехн. спец. вузов / П. Н. Матханов. - Изд. 2-е, доп. и перераб. - М. : Высшая школа, 1986. - 352 с. : ил. - Библиогр.: с. 348. - Предм. указ.: с. 349-350.
7. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П.А. Ионкин., А. В. Нетушил и др. — Изд. 5-е, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. — 527 с. — Библиогр.: с. 513. — На пер. Основы теории цепей. 50 000 экз.
8. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. П. А. Ионкина, - М.: Энергоиздат, 1982. — 767 с. — Библиогр.: с. 762. — На пер. Сборник задач и упражнений по ТОЭ. — 50 000 экз.
9. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / Под ред. Л. А. Бессонова, - М.: Высш. шк., 1980. - 472 с. — Библиогр.: с. 468. — На пер. Сборник задач по ТОЭ. — 67 000 экз.